

## 세라믹막을 이용한 미생물연료전지의 전기화학적 특성 연구

임지영<sup>1</sup>, 박대석<sup>1</sup>, 김진한<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 건설환경공학과, <sup>2</sup>인천대학교 도시환경공학부

### Electrochemical Characteristics of the MFCs using the Ceramic Membrane as a Separator

Ji-Young Lim<sup>1</sup>, Dae-Seok Park<sup>1</sup>, Jin-Han Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University,

<sup>2</sup>School of Urban and Environmental Engineering, Incheon National University.

**요약** 단일챔버 미생물연료전지에 분리막으로 세라믹막과 나피온막을 적용하여 전기발생특성을 분석함으로써 세라믹막의 적용가능성을 구명하고자 하였다. 또한 환원전극으로서 백금촉매가 도포된 탄소전극과 일반 탄소전극을 사용하여 백금촉매 효과 및 전기발생특성을 비교하였다. 회분식 실험에서 전기발생특성이 가장 안정적인 것은 acetate를 기질로 사용하였을 때였다. Formate는 전기발생특성이 acetate보다 다소 높았으나 불안정하였고 propionate와 butyrate는 acetate에 비하여 전기발생량이 상대적으로 낮았다. 환원전극으로서 백금촉매가 도포되어 있는 탄소전극과 일반 탄소전극을 비교한 결과 백금촉매가 도포된 탄소전극의 전력발생량이 일반 탄소전극에 비하여 1.2배 높게 나타났지만 약 5배 정도 비용 차이가 있음을 고려하면 미생물연료전지의 적용에 있어 효율성과 경제성은 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다. 분리막으로서 세라믹막과 나피온막을 적용한 미생물 연료전지에서 발생한 평균 전압은 합성폐수를 이용한 실험에서 각각 523.67 mV ± 49.41 mV, 424.09 mV ± 79.95 mV이었다. 미생물연료전지에 분리막으로 세라믹막과 나피온막을 적용하여 전력발생 및 유기물제거효율을 비교한 결과, 세라믹막이 나피온막의 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** This study attempts to verify the applicability of ceramic membrane as a separator by comparing the power generation characteristics in single-chamber MFCs using ceramic membranes to those in the MFCs using nafion membrane. The generated power in MFCs by using acetate as a substrate was more stable than that by using formate, propionate and butyrate, respectively. It was shown that the generated power by using formate substrate in MFCs was unstable and a little higher than that by using acetate, and the power generated by using propionate and butyrate were lower than that by using acetate. In order to find out the Pt catalyst effect, it was compared the power generated in MFCs using Pt-coated carbon cloth as electrode to that power using normal carbon cloth. The power generated in MFCs using Pt-coated carbon cloth as electrode was 1.2 times higher than that using normal carbon cloth. The Pt-coated carbon cloth was about 5 times more expensive than normal carbon cloth. It is suggested that both power generation efficiency and cost together should be considered in selecting electrodes of MFCs. It was found that the ceramic membrane was superior to nafion membrane by comparing to the power generation characteristics obtained. It was shown that average voltage values were 523.67 mV ± 49.41 mV by using synthetic wastewater, in MFCs of ceramic membrane as a separator. While average voltage values were 424.09 mV ± 79.95 mV by using synthetic wastewater, in MFCs of nafion membrane as a separator. The organic removal efficiency, 41.7% by using ceramic membrane was a little bit higher than 40.8% by using nafion membrane. This research implies ceramic membrane can be a valid alternative to nafion membrane as a separator when considering the power generation and the efficiency of organics removal.

**Keywords** : ceramic membrane, microbial fuel cell, organic removal, power generation, separator

\*Corresponding Author : Jin-Han Kim(Incheon Univ.)

Tel: +82-32-835-8745 email: jinhan@inu.ac.kr

Received May 15, 2015

Revised June 24, 2015

Accepted August 6, 2015

Published August 31, 2015

### 1. 서론

미생물연료전지는 하·폐수 내에 함유된 유기물의 화학에너지를 미생물의 촉매작용을 활용하여 전기에너지로 직접 전환시키는 생물전기화학 시스템이다[Fig. 1][1]. 이를 이용하여 하·폐수 또는 폐기물을 처리한다면, 유기성 오염 물질들은 전기에너지를 생산할 수 있는 지속가능한 원료로 활용이 가능하고, 하·폐수 처리를 위한 비용 절감과 동시에 전기에너지의 생산에 따른 경제적 이득이 가능하다. 미생물연료전지는 유기성 오염물질을 분해, 제거하면서 동시에 전기에너지를 생산할 수 있는 차세대 청정에너지 기술의 하나라고 할 수 있다[2].

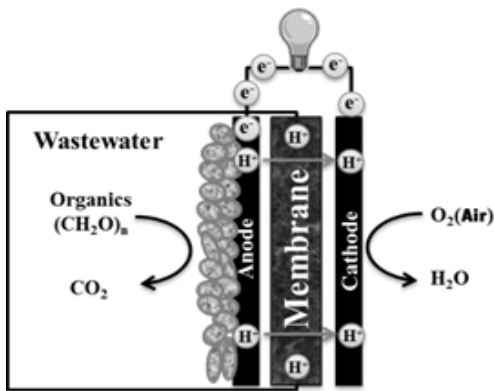


Fig. 1. Schematic view - Electricity Production in a MFC

폐수처리를 위하여 기존의 수처리 기술들은 높은 에너지를 사용하며, 상당한 기반시설 유지 비용을 요구하였다. 이러한 문제를 해결하고자 미생물연료전지의 현장 적용에 대한 연구가 활발히 이루어졌고, 지난 10여년간 비약적으로 발전되어 왔다[3].

미생물연료전지의 현장적용을 위해서는 무엇보다 전력생산을 높이는 것이 중요하며, 이를 위해서는 적절한 전극재료 및 분리막을 선택해야 하는 것이 과제로 남겨진 상태이다. 대부분의 연구에서 분리막으로 사용된 양이온교환막은 가격이 비싸기 때문에 실용화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 미생물연료전지의 실용화를 위한 주요 과제 중 하나는 상용화 된 분리막의 높은 비용과 낮은 기계적 강도를 해결하는 것이다. 이를 해결하기 위하여 저렴하며, 성능이 개선된 재료의 개발은 필수적일 수 밖에 없다.

최근 낮은 생산비용으로 인하여 대체막으로 주목을

받고 있는 물질로는 j-cloth, 세라믹, 천연고무 등이 있다 [4]. 특히, 세라믹막은 재료의 획득이 용이하고, 저렴한 생산비용과 기존 막보다 높은 구조강도로 인하여 미생물 연료전지의 분리막으로서 유망한 물질이며 최근 고가의 고분자막의 대체막으로 사용가능성에 대해 연구된 사례가 있다[5].

본 연구는 미생물연료전지의 분리막으로서 고가의 양이온교환막을 대체할 수 있는 세라믹막의 적용가능성을 검토하고 미생물연료전지의 성능을 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 세라믹막과 양이온교환막인 나피온막을 미생물연료전지의 분리막으로 적용하고 합성폐수를 미생물연료전지의 기질로 이용하였으며 실험을 통해 미생물연료전지의 전기적 성능 특성을 비교하여 세라믹막의 대체막으로서의 적용가능성을 검토하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험재료

본 연구에 사용된 미생물연료전지는 공기환원전극을 사용한 단일챔버이다[Fig. 2].

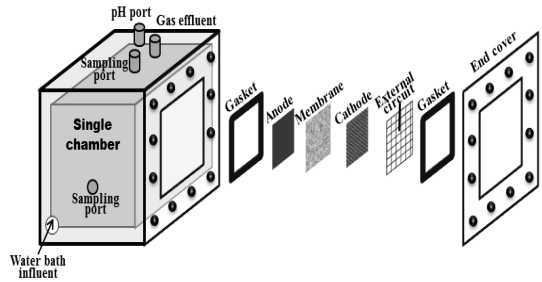


Fig. 2. Schematic of MFC

실험장치의 전체 부피는 1L이며, 산화전극과 환원전극은 각각 흑연펠트와 탄소천을 사용하였다. 분리막은 세라믹막과 양이온교환막인 나피온막을 사용하였다. 미생물에서 산화전극으로 이동된 전자를 환원전극으로 이동시키기 위해 스테인레스 스틸 망에 구리선을 연결하여 외부회로를 구성하였으며, 가변저항기를 설치하여 외부 저항을 걸어주었다. 또한, 항온수조를 사용하여 반응기의 내부온도를 일정하게 유지하였고, 교반기를 이용하여 일정 속도로 교반하였다.

Table 1에 미생물연료전지 반응기 구성을 나타내었다.

**Table 1.** Operation conditions of the MFCs

Items		Specification or Condition
Working volume		1L
Electrode materials	Anode	Graphite felt (Nippon carbon, Japan)
	Cathode	Carbon cloth(Ballard, Canada)
Membrane materials		Ceramic(made of clay) W: 80mm, H: 80 mm, T: 8 mm
		Nafion 117(Dupont, USA) W: 80mm, H: 80 mm
External resistance		1000Ω(RS-200, IET Labs, USA)
Temperature		35℃ (Samheung Instrument, KOREA)
Agitation stirrer speed		130 rpm(Corning, USA)

미생물연료전지 산화전극부의 미생물증식을 위하여 SL공사 음폐수처리장의 혐기성 소화조 슬러지를 식중슬러지로 사용하였다. 식중슬러지의 성상은 Table 2와 같다.

**Table 2.** Characteristics of influent

Type of inoculum	Parameter	Value
Anaerobic sludge	pH	7
	TCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	12,200
	SCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	1,300
	T-N(mg/L)	3,100
	T-P(mg/L)	1,000

또한, 산화전극에 전기화학적 활성 미생물막의 안정적인 형성을 위해 합성폐수를 제조하여 실험에 사용하였다. 합성폐수의 조성은 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 1,885 mg/L, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 1,000 mg/L, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 6.25 mg/L, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 50 mg/L, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 2.5 mg/L, MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 7.5 mg/L, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 12.5 mg/L, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.0625 mg/L, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 20.7492 mg/L, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3.1167 mg/L이었다 [6].

## 2.2 실험방법

합성폐수를 적용한 미생물연료전지에서의 전기적 성능을 분석하기 위하여 식중슬러지와 배지는 1:4의 비율로 혼합하였다. 합성폐수 주입 전 반응기 내부의 혐기성 상태를 유지하기 위해 질소가스로 치환해 주었으며, 합성폐수를 주입하는 동안에도 지속적으로 질소가스로 치

환해 주었다. 음폐수 슬러지는 슬러지 특성상 유분 및 찌꺼기 등의 불순물이 많아 운전기간 동안 반응기 내부의 응집현상을 최소화하기 위하여 제거를 후 사용하였다.

기질 종류에 따른 미생물연료전지의 전력발생량을 비교하기 위하여 순수 기질 중 전기화학활성미생물이 탄소원으로 쉽게 이용할 수 있는 물질 중 탄소수(C1~C4)에 따라 formate, acetate, propionate, butyrate를 기질로 선정하여 실험을 수행하였다. 식중슬러지의 농도는 SCOD<sub>Cr</sub> 1,300 mg/L였으며, 이를 기준으로 formate, acetate, propionate, butyrate를 기질로 하는 합성폐수의 농도도 COD<sub>Cr</sub> 1,300 mg/L로 조절 하였다. 또한, 환원전극으로 사용된 탄소천의 백금촉매 도포 유무에 따른 전력발생 효율을 비교하였다. 분리막 종류에 따른 미생물연료전지의 전력발생량을 비교하기 위하여 세라믹막을 사용하여 나피온막과의 성능을 비교함으로써 분리막으로서 세라믹막의 적용 가능성을 파악하고자 실험을 수행하였다.

## 2.3 분석방법

### 2.3.1 전기적 특성치 모니터링 및 측정

미생물연료전지에서 발생하는 전력량을 측정하기 위하여 반응기에 디지털멀티미터(digital multimeter)를 연결하여 전압 및 전류, 저항을 30분 간격으로 측정하였다. 전력(power, P)은  $P(W) = V \times I$ 로 계산하였다.

발생된 전력량만으로 미생물연료전지의 효율성을 설명하기는 어려우며, 미생물이 성장하는데 필요한 산화전극의 표면적은 생산되는 전력량에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 미생물연료전지에서 생산되는 전력밀도(power density)는 산화전극의 유효 표면적을 적용하여  $P(W/m^2) = V \times I / A$ 로 산출하였다[7].

### 2.3.2 화학적 분석

미생물연료전지에서 처리된 처리수의 COD<sub>Cr</sub> 농도 측정을 위하여 기질이 교체될 때마다 교체전/교체후의 시료를 분석하였다. COD<sub>Cr</sub> 분석은 SCOD<sub>Cr</sub>으로 하였고, 원심분리기를 사용하여 4,500 rpm에서 10분 동안 고액 분리한 후 상등액을 취하여 COD<sub>Cr</sub> 농도를 측정하였다. 또한 산출된 COD<sub>Cr</sub> 제거율을 이용하여 쿨롱(전하량)효율(coulombic efficiency)을 계산하였다. 쿨롱효율은 초기 유기물내에 존재하는 전하량과 전류에 의해 회수된 전하량의 비율로 정의된다. 쿨롱효율 계산식은 식 (1)과

같다[8].

$$C_E = \frac{8 \int_0^{t_b} I dt}{F v_{An} \Delta COD} \quad (1)$$

여기에서,  $C_E$ 는 쿨롱효율(%), 8은 산소 1몰당 분자량인 32와 그에 따라 교환되는 전자수인 4로부터 도출하였으며,  $I$ 는 전류(A),  $F$ 는 패러데이상수(96,500C/mole)이고,  $v_{An}$ 은 산화전극부의 부피(L)가 되며,  $\Delta COD$ 는 COD 변화량(g/L)을 나타낸다.

### 2.3.3 세라믹막 특성 분석

본 실험에 사용된 세라믹막의 특성 및 생물막의 성장 형태를 파악하기 위하여 전계방출형주사전자현미경(FE-SEM; field emission scanning electron microscope)을 이용하여 촬영하였다. 또한 pH와 공극률, 양이온교환능력(CEC; cation exchange capacity)을 측정하였다. 세라믹을 24시간 동안 증류수에 담근 후 용출액의 pH를 측정하였으며, 공극률은 세라믹을 24시간 동안 증류수에 담근 후 흡수되는 물의 양을 측정하여 계산하였다[9]. 양이온교환능력은 한국산업표준 KS IISO 11464에 따라 세라믹을 전처리 한 다음, KS IISO 11260을 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 세라믹막 특성

Table 3은 본 연구에서 사용한 세라믹막과 Ghadge 등(2014)[9]의 연구에서 사용된 세라믹막인 S-1, S-2의 화학적 조성 분석결과를 비교한 것이다. 세라믹막의 성분을 파악하기 위하여 EDS-7001F를 이용하여 화학적 조성을 분석한 결과, 이산화규소( $SiO_2$ )가 68.76%로 가장 많이 함유되어 있었으며, 그 다음으로 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 및 칼슘산화물인 탄산칼슘( $CaCO_3$ )이 주를 이루고 있었다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 사용된 세라믹막은 전형적인 적토(red soil)의 특성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

Table 3. Components of ceramic membrane

Component	Ceramic membrane*(%)	S-1 (%)	S-2 (%)
Ingredients	Red soil	Red soil	Black soil
CaCO <sub>3</sub>	15.50	3.67	1.47
SiO <sub>2</sub>	68.76	57.5	53.40
Na(Albite)	0.61	3.95	0.27
MgO	0.48	0.65	3.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.29	26.30	21.60
K	1.28	1.78	0.80
Ca(Wollastonite)	0.82	0.79	10.40
Ti	0.28	0.66	1.45
Fe	2.98	4.70	6.75

\* Used in this study

본 실험에서 사용된 세라믹막은 점토로 만들어진 것으로, Ghadge 등(2014)[9] 연구에 사용되었던 세라믹막과의 특성을 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Properties of ceramic membrane

Property	Ceramic membrane*	S-1	S-2
pH	6.45	7.4	8.5
Porosity(%)	3.5	11.6	17.6
CEC (cation exchange capacity) (cmol/kg)	140.95**	125***	20***

\* Used in this study

\*\* Korean Industrial Standards KS IISO 11260

\*\*\* Indian standard, IS: 2720(Part 24)-1976: Exchangeable metallic and hydrogen ion

본 실험에 사용된 세라믹막의 pH는 6.45로 측정되었으며 양이온교환능력은 Ghadge 등(2014)[9]에 사용된 세라믹에 비하여 높은 것으로 나타났다.

즉, 양이온교환능력은 140.95 cmol/kg으로 Na 9.54 cmol/kg, K 1.12 cmol/kg, Mg 51.12 cmol/kg, Ca 79.17 cmol/kg으로 측정되었다. Ghadge 등(2014)[9]은 Indian standard를 이용하였으므로 측정법에 차이는 있으나 본 실험에서 사용된 세라믹막의 양이온교환능력이 높음을 알 수 있었다. 또한 공극률(porosity)은 S-1에 비해 약 3.3배 낮았다. 높은 공극률은 물리적인 기질의 손실뿐만 아니라 산화전극부로의 산소유입과 산화전극부의 액이 환원전극으로 이동하게 되어 그 결과, 기질의 직접적인 산화로 인해 미생물연료전지의 쿨롱효율은 저하된다는 연구결과가 있다[9].

### 3.2 미생물연료전지에서의 전기적 성능 분석

#### 3.2.1 기질종류

기질종류에 따른 미생물연료전지의 전기발생량을 비교하기 위하여 formate, acetate, propionate, butyrate를 각각 단일기질로 하여 회분식으로 실험을 수행하였다. 기질의 농도는 COD<sub>Cr</sub>으로 1,300 mg/L이며 발생하는 평균 전압 및 전력밀도를 측정된 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

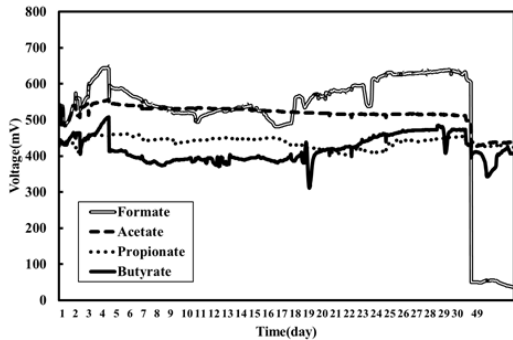


Fig. 3. Generated of average voltage by substrate type

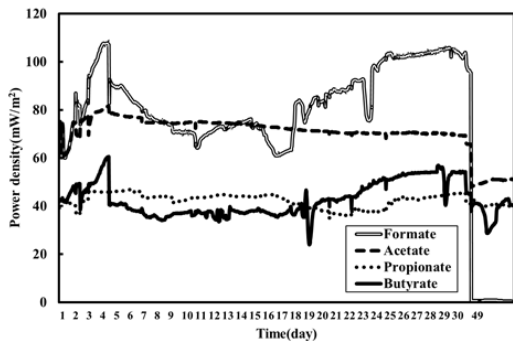


Fig. 4. Generated of power density by substrate type

실험결과, formate를 기질로 사용한 반응기에서 최대 전압과 최대 전력밀도를 발생하였으나 49일을 기점으로 전압이 급격히 감소된 것을 볼 수 있다. Formate를 기질로 사용한 반응기에 연결된 측정기기의 오작동으로 인하여 20일간의 자료가 누락되어 정확히 판단하기에는 무리가 있으나, 다른 반응기와 동일한 조건이었음을 고려해 볼 때 다른 기질들에 비하여 formate의 경우 20일 동안 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 formate가 기질로 사용된 반응기에 기질소모가 완전히 이루어짐으로써 더 이상 유기물질의 분해가 일어나지 않아 전기

가 생산되지 않은데 그 원인이 있을 것으로 추정된다. 반면, formate를 제외한 다른 단일기질들에서는 운전기간이 경과됨에 따라 전압발생이 감소하는 경향을 보이긴 하지만, 비교적 안정적인 값이 지속적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, acetate를 기질로 사용한 반응기에서 전압이 가장 안정적으로 발생되었다.

#### 3.2.2 환원전극 종류

백금촉매가 도포되어 있는 탄소천의 경우 높은 가격 때문에 대규모의 반응기에 적용되기는 실용적이지 못하지만 실험실 규모 미생물연료전지의 성능을 테스트하기에는 유용한 기준 중의 하나이다. 따라서, 백금촉매의 유무에 따른 미생물연료전지의 효율성 및 경제성을 평가해 보고자 하였다.

Acetate를 기질로 사용한 미생물연료전지의 환원전극의 종류에 따른 전력발생량을 측정된 결과를, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 백금촉매가 도포되어 있는 탄소천은 평균  $623.14 \text{ mV} \pm 20.62 \text{ mV}$ 의 전압을 발생하였고 일반적인 탄소천은 평균  $513.23 \text{ mV} \pm 29.38 \text{ mV}$ 의 전압이 발생하였다.

백금촉매가 도포되어 있는 탄소천이 약 1.2배 정도 높은 전압을 나타내었다. 또한 전압뿐만 아니라 전류, 전류밀도, 전력밀도가 모두 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 백금촉매로 인하여 전자이동이 더 원활하게 이루어진 데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 백금촉매가 도포되어 있는 탄소천의 전력발생량이 많기는 하지만, 그 가격이 약 5배 정도 차이가 있음을 고려하면 미생물연료전지의 적용에 있어 효율성과 경제성은 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.

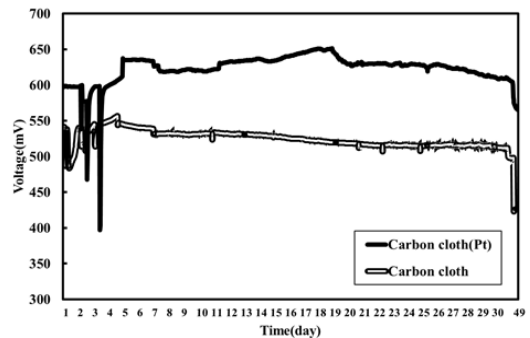


Fig. 5. Comparison of average voltage by platinum catalyst presence of cathode

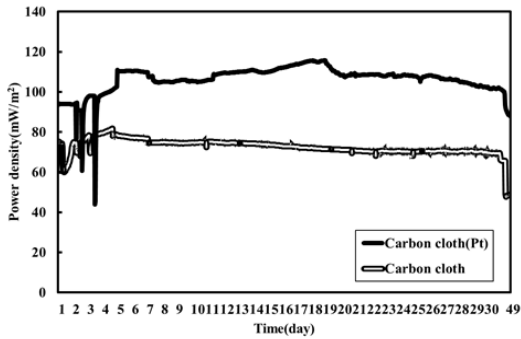


Fig. 6. Comparison of power density by platinum catalyst presence of cathode

3.2.3 분리막 종류

분리막 종류에 따른 전압발생량을 분석하기 위하여 음폐수 혐기성 소화조 슬러지를 식용한 후, acetate를 단일기질로 하는 합성폐수를 사용하여 29일 동안 회분식 실험을 수행하였다.

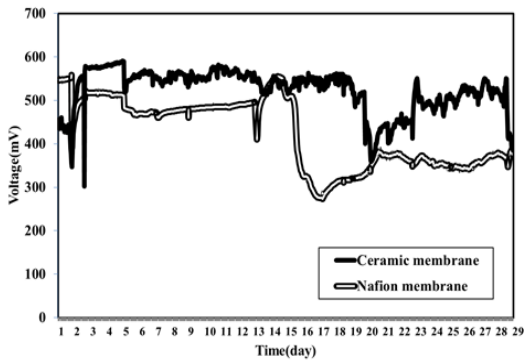


Fig. 7. Comparison of average voltage by separator type

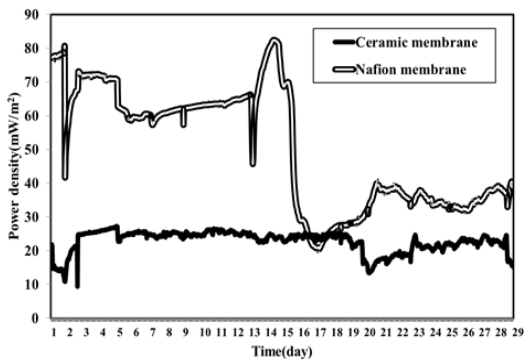


Fig. 8. Comparison of power density by separator type

Fig. 7과 Fig. 8은 분리막 종류에 따라 발생하는 평균 전압을 나타낸 것이다. 세라믹막을 적용한 미생물연료전지의 평균 전압은  $523.67 \text{ mV} \pm 49.41 \text{ mV}$ 였고, 나피온막을 적용한 미생물연료전지의 평균 전압은  $424.09 \text{ mV} \pm 79.95 \text{ mV}$ 이었다. 따라서, 세라믹막이 나피온막보다 평균적으로 약 20% 높은 전압이 발생됨을 알 수 있었다.

Table 5는 분리막 종류에 따른 COD<sub>Cr</sub> 농도 변화이다. 본 실험에서 사용된 합성폐수의 초기 COD<sub>Cr</sub> 농도는 1,300 mg/L 이었으며, 29일 후 세라믹막을 사용한 반응기의 COD<sub>Cr</sub> 농도는 1,234 mg/L이었고, 나피온막을 사용한 반응기의 COD<sub>Cr</sub> 농도는 1,224 mg/L였다. 세라믹막과 나피온막을 사용한 미생물연료전지의 유기물 제거율은 각각 5.1%, 5.9%이었다.

Table 5. Variations of COD<sub>Cr</sub> concentration by separator type

Item \ Membrane	Ceramic	Nafion
Initial COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	1,300	1,300
Final COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	1,234	1,224
COD <sub>Cr</sub> removal efficiency(%)	5.1%	5.9%

각 반응기의 소모된 유기물에 대하여 전류로써 회수된 전하량의 비율인 쿨롱효율을 분석하였다. 쿨롱효율은 실험기간 동안의 누적전류량과 유기물제거량을 이용하여 식 (1)에 의해 계산되었으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 세라믹막은 약 15.69%의 쿨롱효율을 나타내었고, 나피온막은 약 36.09%의 쿨롱효율을 나타내었다.

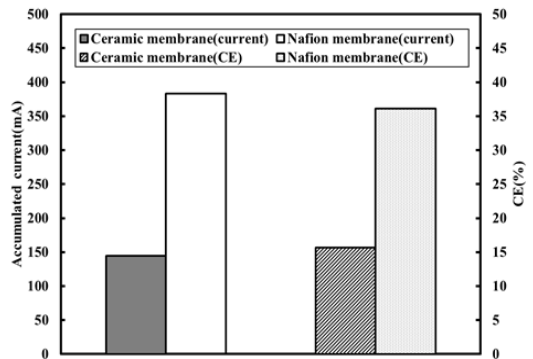


Fig. 9. Comparing the coulombic efficiency by separator type

세라믹막은 가변저항기를 사용하여 외부저항을 1,000 Ω으로 설정하였지만 실제 측정결과, [Fig. 10]에 나타난 바와 같이 나피온막에 비하여 상대적으로 매우 높은 저항이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 결국, 높은 저항값으로 인하여 전류량이 낮게 측정되었는데, 이는 세라믹막의 반복적인 재사용 및 전극과 미생물간의 저항 발생 등의 원인으로 인하여 전체적인 내부저항이 증가된 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

반면, 나피온막은 재사용이 어렵기 때문에 실험시마다 새로운 막으로 교체하여 사용하였다. 따라서, 나피온막은 세라믹막에 비하여 전력발생에 있어 방해물질들의 영향을 최소한으로 줄일 수 있었기 때문에 이 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 미생물연료전지의 지속적인 연구를 위해서는 세라믹막의 내부저항을 줄일 수 있는 방안이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

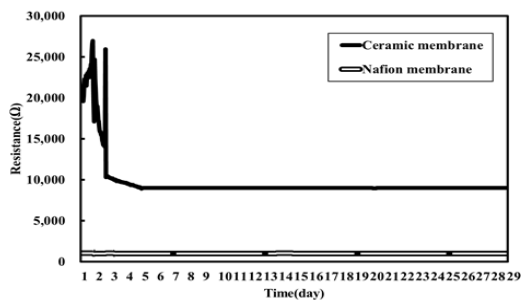


Fig. 10. Comparing the resistance values by separator type

### 3.3 분리막의 표면 변화

세라믹막 및 나피온막의 실험전, 실험후의 사진과 실험후 분리막에 형성된 생물막의 형상을 FE-SEM을 이용하여 관찰하였다. Fig. 11과 Fig. 12를 살펴보면, 세라믹막의 경우 생물막이 넓게 안정적으로 퍼져있는 것을 관찰할 수 있으며 나피온막의 경우 생물막이 부분적으로 뭉쳐있는 모습을 볼 수 있었다.

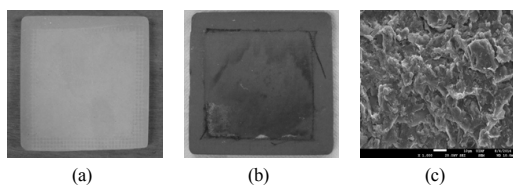


Fig. 11. Photograph of ceramic membrane  
(a) Before experiment (b) After experiment  
(c) FE-SEM after experiment(×1,000)

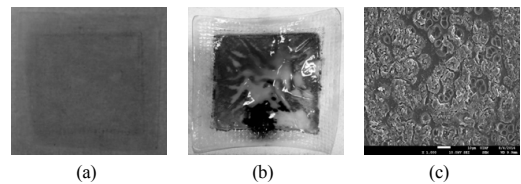


Fig. 12. Photograph of nafion membrane  
(a) Before experiment (b) After experiment  
(c) FE-SEM after experiment(×1,000)

## 4. 결론

본 연구에서 분리막 종류에 따른 미생물연료전지의 전기적 성능 특성을 분석하여 분리막으로서 세라믹막의 적용가능성을 평가 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 회분식 실험에서 전기발생특성이 가장 안정적인 것은 acetate를 기질로 사용하였을 때였고, formate는 전기발생특성이 acetate보다 다소 높았으나 불안정하였다. Propionate와 butyrate는 acetate에 비하여 전기발생량이 상대적으로 낮게 발생되었다.
- 미생물연료전지에서 전력발생량에 미치는 백금촉매의 효과를 확인하였다. 환원전극으로써 백금촉매가 도포되어 있는 탄소전과 일반 탄소전을 비교한 결과 백금촉매가 도포되어 있는 탄소전의 전력발생량이 일반 탄소전에 비하여 1.2배 높은 반면, 그 가격은 약 5배 정도 차이가 있음을 고려하면 미생물연료 전지의 적용에 있어 효율성과 경제성은 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 분리막으로서 세라믹막과 나피온막을 적용한 미생물연료전지에서 발생한 평균 전압은 각각  $523.67 \text{ mV} \pm 49.41 \text{ mV}$ ,  $424.09 \text{ mV} \pm 79.95 \text{ mV}$ 이었다. 이로부터 미생물연료전지에서의 세라믹막 적용시 나피온막에 비하여 전압발생특성이 우수한 것으로 나타났다.

결론적으로 미생물연료전지에 분리막으로서 세라믹막과 나피온막을 적용한 실험에서 전력발생 및 유기물 제거효율을 비교한 결과, 세라믹막이 나피온막의 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

References

[1] L. Hong, R. Ramnarayanan, B. E. Logan, "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell", *Environ. Sci. Technol.*, 38(7), pp. 2281-2285, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es034923g>

[2] S. I. Kim, S. M. Han, J. H. Kim, "KISTEP selected 10 kinds of promising technology in 2012", Issue paper 2012-01, KISTEP, 2012.

[3] D. Pant, G. V. Bogaert, L. Diels, K. Vanbroekhoven, "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production", *Bioresource Technology*, 101(6), pp. 1533 - 1543, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>

[4] J. R. Kim, S. Cheng, S. E. Oh, B. E. Logan, "Power generation using different cation, anion and ultrafiltration membranes in microbial fuel cell", *Environ. Sci. Technol.*, 41(3), pp. 1004-1009, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es062202m>

[5] N. G. Anil, S. Mypati, D. Narcis, M. G. Makarand, "Influence of ceramic separator's characteristics on microbial fuel cell performance", *J. Electrochem. Sci. Eng.*, 4(4), pp. 315-326, 2014.

[6] W. Liling, H. Hongliang, S. Jianquan, "Effects of temperature and ferrous sulfate concentrations on the performance of microbial fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), pp. 11110-11116, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.019>

[7] B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey, "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology", *Environ. Sci. Technol.*, 40(17), pp. 5181 - 5192, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es0605016>

[8] B. E. Logan, *Microbial Fuel Cells*, McGraw-Hill, NewYork, 2008.

[9] A. N. Ghadge, M. Sreemannarayana, N. Duteanu, M. M. Ghangrekar, "Influence of ceramic separator's characteristics on microbial fuel cell performance", *J. Electrochem. Sci. Eng.*, 4(4), pp. 315-326, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5599/jese.2014.0047>

임 지 영(Ji-Young Lim)

[준회원]



- 2015년 2월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(공학석사)
- 2015년 3월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(박사과정)

<관심분야>  
물환경, 환경에너지

박 대 석(Dae-Seok Park)

[준회원]



- 2014년 2월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(공학석사)
- 2014년 4월 : 인천환경공단
- 2015년 3월 : 인천대학교 일반대학원 건설환경공학과(박사과정)

<관심분야>  
물환경, 환경에너지

김 진 한(Jin-Han Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1985년 5월: 한국화학연구원 연구원
- 1985년 9월 ~ 2010년 2월: 인천전문대학 조교수, 부교수, 교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 도시환경공학부 교수

<관심분야>  
물 환경, 환경에너지